

PEMBUATAN DAN ANALISIS EXCITER GENERATOR RF UNTUK SIKLOTRON PROTON DECY-13

Prajitno

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281

e-mail: prajit@batan.go.id

Diterima 18 Mei 2011, diterima dalam bentuk perbaikan 19 Juli 2011, disetujui 19 Agustus 2011

ABSTRAK

PEMBUATAN DAN ANALISIS EXCITER GENERATOR RF UNTUK SIKLOTRON PROTON DECY-13.

Telah dilakukan analisis dan pembuatan exciter generator RF untuk siklotron proton 13MeV. Generator RF akan digunakan sebagai sumber tegangan pemercepat bolak-balik siklotron DECY-13 rancangan PTAPB-BATAN. Berdasarkan dokumen rancangan dasar yang telah dibuat siklotron Decy-13 akan menggunakan medan magnet 1,275 Tesla, sehingga frekuensi generator RF bila menggunakan harmonik keempat adalah 77,667 MHz. Salah satu teknik pembangkitan sinyal radio frekuensi untuk siklotron yang saat ini dikembangkan di dunia adalah dengan teknik Direct Digital Synthesizer (DDS). Teknologi DDS adalah sirkuit arsitektur inovatif yang memungkinkan manipulasi frekuensi dengan cepat dan tepat pada keluarannya dan sepenuhnya di bawah kontrol digital. Prototip exciter generator RF yang telah dibuat menggunakan DDS tipe AD9851 buatan Analog Device dengan frekuensi dasar 30 MHz. dan dikendalikan oleh mikrokontroler ATmega16. Untuk menghindari timbulnya frekuensi yang tidak diharapkan pada keluarannya, keluaran DDS dilewatkan rangkaian band pass filter pasif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rentang frekuensi keluaran exciter adalah 2 MHz dengan frekuensi tengah 77,667 MHz. dan stop band -3dB. Sedangkan keluaran daya RF 10 Watt memerlukan catu daya + 12 V dengan arus 2,9 A. Meskipun prototip sudah berhasil dibuat dan hasilnya sesuai yang diharapkan, tetapi masih perlu disempurnakan.

Kata kunci: Exciter, generator RF, band pass filter, siklotron

ABSTRACT

MANUFACTURE AND ANALYSIS OF EXCITER RF GENERATOR FOR PROTON CYCLOTRON DECY-13.

Exciter of the RF generator for 13MeV proton cyclotron have been analyzed and manufactured. RF generator will be used as a source of alternating voltage accelerating of the DECY-13 cyclotron which designed by PTAPB-BATAN. Based on the basic design documents that have been made, the Decy-13 cyclotron will use 1.275 Tesla magnetic field so that the RF generator frequency when using the fourth harmonic is 77.667 MHz. One of the radio frequency signal generation technique where the output frequency is very stable and easy to set up and is currently being developed is the technique of Direct Digital Synthesizer (DDS). DDS technology is an innovative circuit architecture that allows fast and precise frequency manipulation of its output, under full digital control. Prototype of the RF generator exciter that was created using DDS type AD9851 manufactured by Analog Devices with a fundamental frequency of 30 MHz and controlled by the ATmega16 microcontroller. To avoid unexpected frequency of its output, the output signal of the DDS is passed to the passive band pass filter circuit. The test results showed that the exciter output frequency range is 2 MHz with center frequency of 77.667 MHz. and stop band -3 dB. While RF power output 10 Watt require +12V power supply with current 1,6 A. Although the exciter prototype still needs improvement but the results are as expected.

Keywords: Exciter, RF generation, direct digital synthesizer, cyclotron

PENDAHULUAN

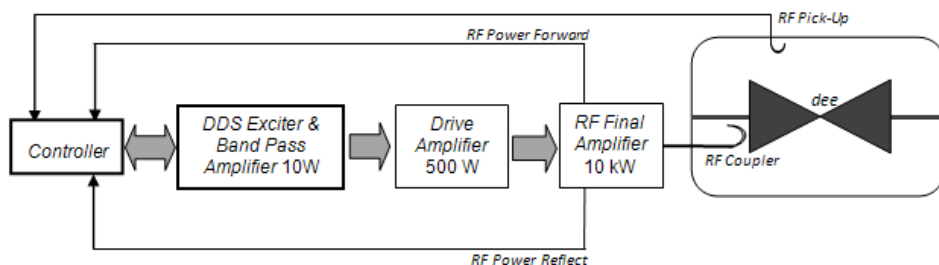
Sejalan dengan RPJMN 2010-2014 bidang Iptek, BATAN melaksanakan kegiatan prioritas bidang pembangunan Iptek yang terdiri atas prioritas bidang penguatan Sistem Inovasi Nasional (SIN) dan Peningkatan Penguasaan, Pengembangan dan Pemanfaatan Iptek (P3IPTEK) dengan fokus pembangunan

tenaga nuklir dan radioisotop dalam rangka meningkatkan pemanfaatan energi nuklir, isotop dan radiasi di bidang pangan, energi, kesehatan dan obat serta sumber daya alam dan lingkungan yang berorientasi pada kebutuhan masyarakat. Dalam bidang kesehatan diharapkan menghasilkan keluaran antara lain berupa rancangan detil siklotron 13 MeV untuk pembuatan radiofarmaka dan pengembangan obat.

Dalam upaya mendukung pengembangan teknologi akselerator saat ini di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan Yogyakarta sedang melakukan kegiatan kajian perancangan siklotron proton dengan sasaran dapat diperoleh rancangan detil siklotron 13 MeV dan prototipe *Radio Frequency (RF)* dan magnet.

Tujuan dari kegiatan pembuatan dan analisis prototip sistem generator RF adalah untuk merealisasikan rancangan dasar yang telah dibuat sebelumnya dengan memanfaatkan komponen dan modul elektronik yang ada di pasar lokal. Sasaran dari kegiatan ini adalah diperolehnya prototip generator RF yang terdiri dari *exciter DDS*, *bandpass amplifier*, *drive amplifier* dan *final amplifier* yang keluarannya digunakan untuk mencatu tegangan *dee* melalui *RF coupler* seperti blok diagram Gambar 1.

Bagian yang paling penting dari sistem generator RF adalah *exciter* karena pada bagian inilah stabilitas generator RF ditentukan, oleh karena itu pada makalah ini diuraikan pembuatan dan analisis prototip *exciter* yang menggunakan rangkaian terintegrasi DDS buatan *Analog*



Gambar 1. Blok diagram sistem generator RF.

Device tipe AD9851 dengan sistem *clock* yang berasal dari rangkaian osilator kristal dan pengaturan frekuensi dilakukan oleh *controller* berbasis mikrokontroler. Sedangkan untuk mengantisipasi frekuensi ikutan yang keluar dari DDS digunakan *band pass filter* dengan frekuensi tengah 77,667 MHz. Keluaran *band pass filter* selanjutnya diumpankan ke penguat RF yang dapat mengeluarkan daya RF 10 W.

PRINSIP DASAR GENERATOR RF

Siklotron mempercepat ion secara periodik dengan menggunakan tegangan pemercepat bolak-balik yang dipasang pada dua buah elektrode berongga yang dihampakan sehingga dapat dilintasi oleh berkas ion. Dengan medan magnet yang kuat timbul gaya *Lorenz* yang merupakan gaya sentripetal pada berkas ini sehingga lintasannya melingkar dan dapat dipercepat berulang-ulang setiap kali melalui celah di antara kedua elektrode yang disebut *Dee*. Catu tegangan pemercepat bolak-balik dibangkitkan oleh generator *Radio Frequency (RF)* yang frekuensinya (f) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut: ⁽¹⁾

$$f_{ion} = \frac{qB_0}{2\pi M_0} \quad (1)$$

$$f_{rf} = h \times f_{ion} \quad (2)$$

Keterangan :

- q : muatan partikel berkas
- B_0 : kuat medan magnet
- M_0 : massa partikel bebas proton
- h : nomor harmonik

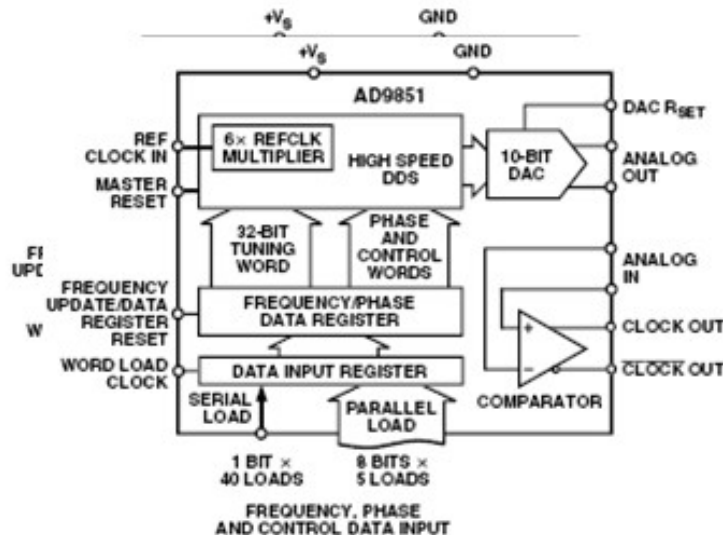
Hasil kajian perhitungan medan magnet untuk siklotron 13 MeV DECY-13 telah dilakukan, siklotron akan menggunakan medan magnet rerata (B_0) 1,275 Tesla dan nomor harmonik 4 ⁽²⁾. Selain itu berdasar referensi dari *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*⁽¹⁾ muatan partikel berkas $q = 1,602E^{-19}$ coulomb dan massa

partikel bebas proton $M_0 = 1,673 \times 10^{-27}$ kg. Oleh karena itu frekuensi yang akan digunakan untuk siklotron DECY-13 dapat dihitung menggunakan persamaan (1) dan (2) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} f_{ion} &= \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 1,275}{2 \times 2,141 \times 1,673^{-27}} \quad \text{Hz} \\ &= 1,9417 \times 10^7 = 19,417 \quad \text{MHz} \\ f_{rf} &= 4 \times 19,417 = 77,667 \quad \text{MHz} \end{aligned}$$

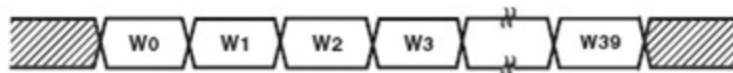
AD9851

AD9851^(3,4) adalah perangkat sangat terintegrasi yang menggunakan teknologi terdepan DDS, digabung dengan pengubah D/A internal kecepatan dan kinerja tinggi dan pembanding, untuk membentuk sintesis frekuensi yang diprogram secara digital. Ketika diberi referensi dari sumber *clock* akurat, AD9851 menghasilkan keluaran gelombang sinus analog yang frekuensinya stabil. AD9851 menerima 32 bit frekuensi *tuning word*, yang menghasilkan keluaran resolusi pengatur sekitar 0,04 Hz dengan sistem *clock* 180 MHz. AD9851 berisi sirkuit pengali REFCLK 6× yang menghilangkan kebutuhan untuk referensi osilator kecepatan tinggi dan memiliki dampak minimal pada *Spurious Free Dynamic Range (SFDR)* dan fase karakteristik derau (*noise*).



Gambar 2. Blok diagram fungsi AD9851

Pada Gambar 2 terlihat blok diagram fungsi dari DDS AD9851, pengaturan frekuensi dan fase keluaran dapat dilakukan dengan memasukkan data ke *data input register* secara serial atau parallel. Apabila memasukkan data secara serial maka data yang perlu dimuat adalah 1 bit x 40 sedangkan bila memasukkan data secara parallel 8 bit x 5. *Ref Clock In* menerima masukan dari osilator kristal. Urutan data yang harus dimuat ke *data input register* seperti tertampil pada Gambar 3.



Gambar 3. Runtutan data serial yang dimuat ke *data input register* DDS AD9851

Perhitungan Frekuensi Keluaran AD9851

Keluaran frekuensi dari perangkat DDS AD9851 ditentukan dengan persamaan:^(3,4)

$$f_{out} = \frac{M \times f_{out} \times Ref\ Clk}{2^N} \quad (3)$$

$$M = \frac{f_{out} \times 2^N}{RefClk} \quad (4)$$

Keterangan :

- f_{out} : frekuensi keluaran dari DDS
- M : frequency tuning word
- $RefClk$: referensi internal frekuensi clock
- N : panjang dalam bit dari akumulator fasa

Sesuai dengan perhitungan, frekuensi yang akan digunakan untuk siklotron DECY-13 adalah 77,667 MHz., dengan menggunakan persamaan (4) dapat ditentukan nilai yang harus dimasukkan ke dalam *frequency control* dari DDS.

Selain frekuensi utama yang sesuai rancangan, keluaran frekuensi DDS juga disertai dengan frekuensi lain yang merupakan gabungan dari frekuensi keluaran (f_1) dan frekuensi clock (f_2). Frekuensi tersebut diantaranya f_2-f_1 , f_2-2f_1 , $2f_2-3f_1$ dan $2f_1$ ⁽⁵⁾. Guna meminimalkan pengaruh frekuensi yang tidak diharapkan tersebut maka keluaran DDS dilewatkan rangkaian *band pass filter* dengan sasaran hanya frekuensi yang diinginkan saja yang muncul pada keluaran DDS.

FILTER

Low Pass Filter (LPF)

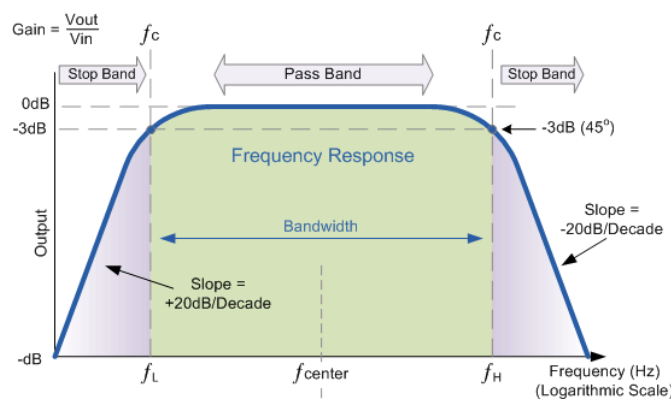
Low Pass Filter adalah filter yang hanya melewatkan frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi *cut-off* (f_c), di atas frekuensi tersebut keluarannya mengecil karena diberi redaman yang sangat besar.

High Pass Filter (HPF)

High Pass Filter adalah filter yang keluarannya hanya melewatkan frekuensi diatas frekuensi *cut-off* (f_c), di bawah frekuensi tersebut keluaran diredam sehingga idealnya menjadi tidak ada.

Band Pass Filter (BPF)

Band pass filter merupakan rangkaian filter yang hanya memperbolehkan frekuensi dengan rentang (*band*) tertentu untuk dapat melewatinya, dengan memberi redaman yang sangat besar pada frekuensi yang terlalu tinggi dan terlalu rendah. Sehingga rangkaian *band pass filter* memiliki dua frekuensi *cut-off* (f_{cH} dan f_{cL}) seperti tertampil pada Gambar 4.



Gambar 4. Tangapan gain vs frekuensi *Band Pass Filter*

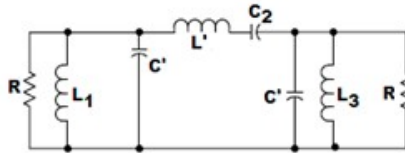
Untuk menentukan nilai-nilai kapasitan dan induktan pada band pass filter digunakan persamaan sebagai berikut :

$$f_{center} = \sqrt{f_L f_H} \quad (5)$$

$$\text{Band Width} = f_H - f_L \quad (6)$$

$$L' = \left(\frac{R'}{R} \right) \left(\frac{1}{2\pi \times BW \times 10^6} \right) \times 2(H) \quad (7)$$

$$C' = \left(\frac{R}{R'} \right) \left(\frac{1}{2\pi \times BW \times 10^6} \right) (F) \quad (8)$$



Gambar 5. Rangkaian band pass filter

$$C_2 = \frac{1}{L'(2\pi \times f_0)^2} \quad (9)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1}{C'(2\pi \times f_0)^2} \quad (10)$$

Mikrokontroler ATmega16

AVR merupakan seri mikrokontroler CMOS 8-bit buatan Atmel, berbasis arsitektur *RISC (Reduced Instruction Set Computer)*. Hampir semua instruksi dieksekusi dalam satu siklus *clock*. AVR mempunyai 32 *register general-purpose*, *timer/counter* fleksibel dengan mode *compare*, *interrupt internal* dan eksternal, serial *UART*, *programmable Watchdog Timer*, dan *mode power saving*, *ADC* dan *PWM internal*. AVR juga mempunyai *In-System Programmable Flash on-chip* yang memungkinkan memori program untuk diprogram ulang dalam system menggunakan hubungan serial *SPI*. ATmega16.

TATA KERJA

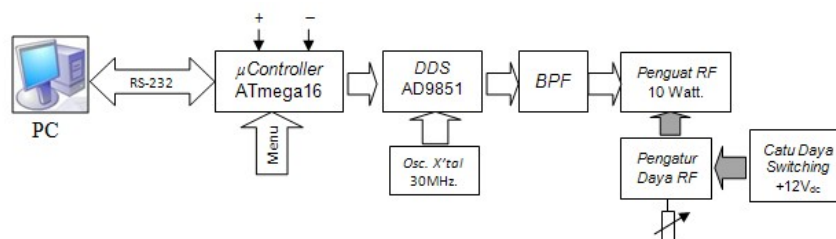
Bahan dan Alat Penelitian

Bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian pembuatan *exciter* ini adalah sebagai berikut

1. IC AD9851 beserta pendukungnya yaitu kapasitor, resistor dan induktor
2. Kristal 30 MHz.
3. Modul catu daya linier 12V dan catu daya *switching* 12 – 13,8V
4. Modul penguat RF 10 Watt
5. Modul mikrokontroler
6. *Oscilloscope*
7. *Spectrum Analyzer*
8. Digital Multimeter
9. *Soldering Iron*
10. *SMD rework station*

Susunan Exciter Generator RF DECY-13

Pembuatan *exciter* generator RF dengan susunan seperti terlihat pada Gambar 6, terdiri dari modul mikrokontroler ATmega16 yang berfungsi untuk mengatur frekuensi dan fase keluaran DDS, DDS AD9851 yang dilengkapi osilator kristal 30 MHz, *Band Pass Filter* dan penguat RF.



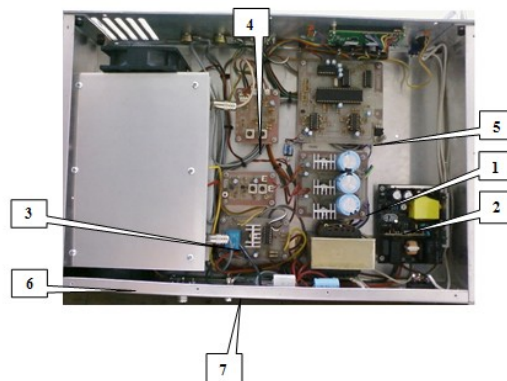
Gambar 6. Blok diagram *exciter* generator RF

HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototip *exciter* generator RF untuk siklotron DECY-13 telah selesai dibuat dengan tata letak modul elektronik sebagai tertampil pada Gambar 7.

Modul-modul elektronik yang telah diinstal adalah :

1. Catu daya linier $\pm 12 V_{dc}$ untuk mencatu rangkaian elektronik modul DDS, mikrokontroler dan osilator kristal 30 MHz.
2. Catu daya *switching* + 12 V_{dc} digunakan untuk mencatu tegangan penguat RF 10 W
3. Osilator kristal 30 MHz. sebagai frekuensi referensi DDS
4. DDS AD9851 dan *band pass filter*
5. ATmega16 untuk mengatur kinerja DDS AD9851
6. Penguat RF dengan keluaran maksimum 10 Watt
7. Pengatur keluaran daya RF dan *Automatic Level Control* penguat RF

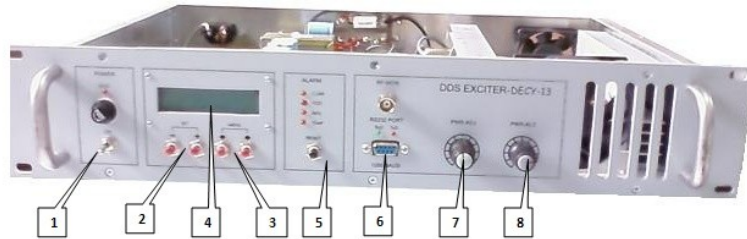


Gambar 7. Tata letak prototip *exciter* generator RF

Panel depan prototip *exciter* generator RF seperti terlihat pada Gambar 8, terdapat tombol, knop, konektor, tampilan LCD dan LED dengan penjelasan fungsi sebagai berikut :

1. *Switch ON/OFF* dan *fuse* pengaman
2. Tombol untuk mengubah frekuensi turun (–) atau naik (+)
3. Tombol untuk pemilihan menu *software*
4. *Liquid Crystal Display (LCD)* untuk menampilkan frekuensi
5. Indikator trip:
 - CURR (arus penguat RF)
 - VDD (tegangan penguat RF)
 - REFL (*Refected power*)
 - TEMP (suhu pendingin penguat RF) dan
 - Tombol reset.
6. Konektor DB-9 untuk komunikasi data serial komputer dengan *baud rate* 1200-19200.
7. Knop untuk mengatur keluaran daya RF secara manual

8. Knop untuk mengatur Automatic Level Control



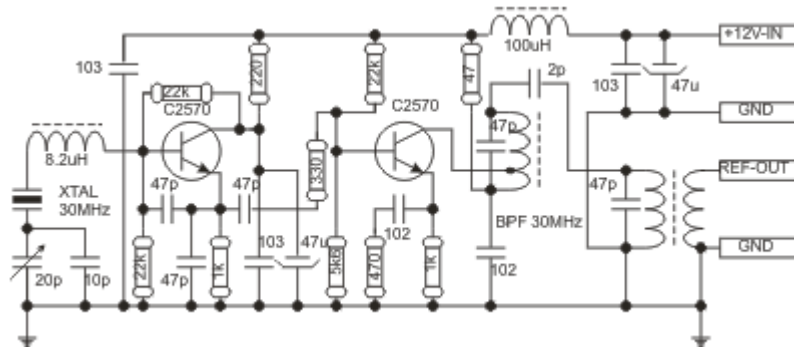
Gambar 8. Tampilan panel depan prototip exciter

Panel belakang untuk fasilitas masukan tegangan catu 220 Vac, masukan ALC dan keluaran RF, seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Tampilan panel belakang prototip exciter

Frekuensi referensi 30 MHz.



Gambar 10. Rangkaian elektronik frekuensi referensi 30 MHz.

Frekuensi referensi DDS AD9851 dibangkitkan dari osilator kristal 30 MHz, kristal yang digunakan adalah tipe HC494/AH dengan stabilitas frekuensi ± 50 ppm. Untuk menghindari munculnya frekuensi harmonik keluaran osilator dilewatkan rangkaian band pass filter 30 MHz. sehingga frekuensi yang masuk ke DDS AD9851 hanya yang sesuai kristal.

Pengaturan Frekuensi Keluaran DDS

Pengaturan frekuensi keluaran 77,667 MHz dilakukan dengan mengirimkan data secara serial melalui pin-7 DDS AD9851, data *frequency tuning word* yang harus dikirimkan dihitung menggunakan persamaan (4) yaitu :

$$M = \frac{77,667 \times 2^{32}}{180}$$

$$M = 1853206805_D \rightarrow \overset{\text{MSB}}{01101110} \overset{\text{LSB}}{01110101 \ 10110001 \ 00010101}_B$$

| Serial Load Word | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|---|---|-------|---|---|---|----------|---|-----------------------|---|--------------|---|---|---|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| ↓ MSB | | | | ↓ LSB | | | | Pwr Down | | | | 6x Ref Clock | | | | ↓ MSB | | | | | | | | | | | | | | | | ↓ LSB | | | | | | | | | |
| fase | | | | | | | | | | frequency tuning word | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Gambar 10. Runtunan data untuk frekuensi 77,667 MHz.

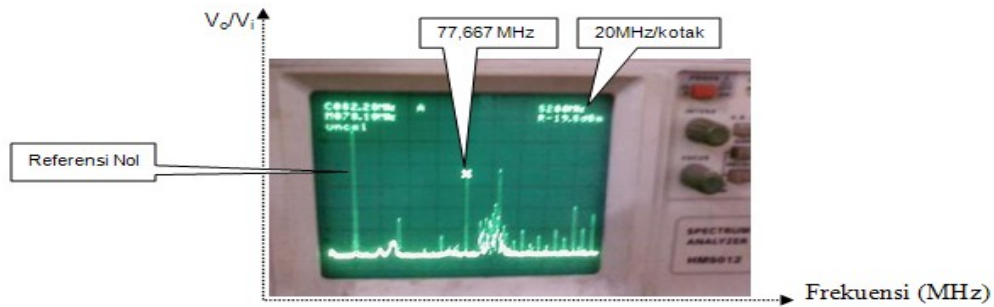
- W_{32} : Pilihan faktor pengali frekuensi referensi
: 1 frekuensi referensi $6 \times \text{REFCLK}$
: 0 frekuensi referensi $1 \times \text{REFCLK}$
 W_{33} : kondisi *logic* harus 0
 W_{34} : 1 *Power down* ON, tidak ada keluaran sinyal
: 0 *Power down* OFF, sinyal keluaran dalam kondisi normal
 $W_{35} - W_{39}$: Untuk pengaturan fase dengan penambahan setiap bit 11.25°
 W_{32} : Pilihan faktor pengali frekuensi referensi
: 1 frekuensi referensi $6 \times \text{REFCLK}$
: 0 frekuensi referensi $1 \times \text{REFCLK}$
 W_{33} : kondisi harus 0
 W_{34} : 1 *Power down* ON, tidak ada keluaran sinyal
: 0 *Power down* OFF, sinyal keluaran dalam kondisi normal
 $W_{35} - W_{39}$: Untuk pengaturan fase dengan kenaikan 11.25°

Data dalam bentuk runtunan bit inilah yang harus dimuat dalam *data input register* secara serial untuk menentukan frekuensi keluaran DDS dengan panjang 32 bit, dengan urutan mulai *LSB* dan terakhir *MSB* atau dari kiri ke kanan atau mulai W_0 dan berakhir dengan W_{31} , seperti tertampil pada Gambar 10. Sisa 8 bit yaitu bit ke 32 sampai bit 39 digunakan untuk mengatur pilihan frekuensi referensi AD9851, *power-down* dan fase. Pengaturan fase dimulai dari *LSB* dan berakhir pada bit *LSB*. Posisi runtunan bit yang dimuat ke *data input register* untuk frekuensi 77,667 MHz seperti ditampilkan pada Gambar 10.

Pengamatan Frekuensi Keluaran Exciter DDS AD9851

Pengamatan frekuensi keluaran dilakukan menggunakan *Spectrum Analyzer* Hameg-5012. Spektrum frekuensi keluaran *exciter* DDS AD9851 seperti tertampil pada Gambar 11, nampak bahwa selain frekuensi yang diharapkan yaitu 77,667 MHz juga muncul frekuensi lain yang merupakan selisih atau kelipatan dari frekuensi *clock* DDS (f_2) dan frekuensi keluaran *exciter* yang diharapkan (f_1) antara lain :

$$\begin{aligned}
 f_1 &= 77,667 \text{ MHz. } (-2,84\text{dB}) \\
 f_2 &= 180,000 \text{ MHz. (referensi)} \\
 f_2 - f_1 &= 180 - 77,667 = 102,333 \text{ MHz. } (-5,24 \text{ dB}) \\
 2f_1 &= 2 \times 77,667 = 155,334 \text{ MHz. } (-52,65 \text{ dB}) \\
 f_2 - 2f_1 &= 180 - (2 \times 77,667) = 24,666 \text{ MHz. } (-55,24 \text{ dB}) \\
 2f_2 - 3f_1 &= (2 \times 180) - (3 \times 77,667) = 126,999 \text{ MHz } (-64,86 \text{ dB})
 \end{aligned}$$

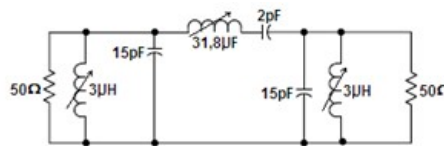


Gambar 11. Spektrum frekuensi keluaran exciter DDS AD9851

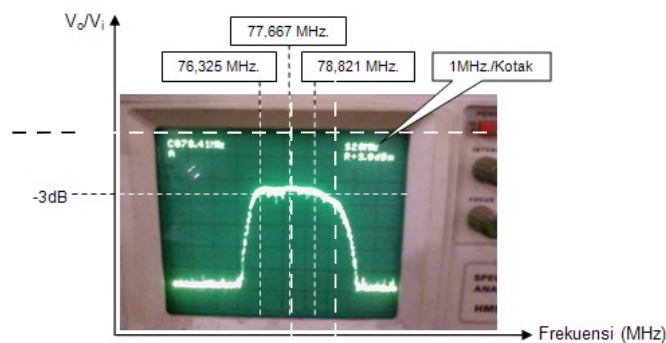
Pada Gambar 11 tampilan spektrum frekuensi diatur satu kotak = 20 MHz. dan pada bagian kiri spektrum yang paling tinggi adalah frekuensi referensi, terlihat pada layar spektrum yang diberi tanda x adalah frekuensi yang diharapkan yaitu 77,667 MHz, sedangkan frekuensi lainnya harus diredam menggunakan *bandpass filter*.

Bandpass Filter

Untuk menghindari munculnya frekuensi-frekuensi yang tidak diharapkan pada keluaran *exciter*, keluaran DDS AD9851 perlu dilewatkan rangkaian *band pass filter* dengan tujuan meredam frekuensi-frekuensi yang tidak diharapkan. Dengan menggunakan persamaan (5,6,7,8,9,10) dapat diperoleh nilai-nilai kapasitor dan induktor seperti yang tertampil pada Gambar 12. Nilai kapasitan diambil menggunakan standar nilai komponen yang ada di pasaran, oleh karena itu untuk mengkompensasi agar $(stop\ band)_L$ dan $(stop\ band)_H$ dapat dipenuhi sesuai dengan rancangan maka digunakan induktor yang nilai induktansinya dapat diubah.



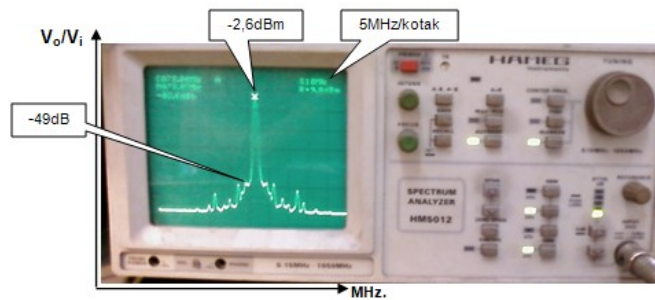
Gambar 12. Band pass filter untuk rentang frekuensi 76,667 – 78,667 MHz.



Gambar 13. Keluaran exciter gain vs frekuensi (MHz)

Hasil pengamatan *band pass filter* menggunakan *spectrum analyzer* dengan frekuensi tengah 77,667 MHz. dan standar $f_{cut-off} -3\text{ dB}$ diperoleh $f_{cut-off\ bawah} = 76,325\text{ MHz}$ dan $f_{cut-off\ atas} = 78,821\text{ MHz}$ seperti ditampilkan pada Gambar 13. Terjadi penyimpangan *pass band* sebesar 0,249 MHz dibandingkan dengan rancangan, hal ini kemungkinan disebabkan oleh toleransi dari komponen yang digunakan dan kurang tepatnya pengaturan induktansi.

Pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa frekuensi-frekuensi yang tidak diperlukan sudah teredam ($\leq -49\text{ dBm}$) dan yang muncul adalah frekuensi 77,667 MHz. (-2,6 dBm) yang menjadi masukan penguat RF. Namun hasil ini masih perlu ditingkatkan karena untuk mencatu sumber daya pemercepat ion, selain frekuensinya harus sangat stabil, *bandwidth*-nya juga harus sesempit mungkin agar daya yang disalurkan ke sistem *dee* menjadi efisien.



Gambar 14. Frekuensi vs penguatan keluaran penguat RF

Modul penguat RF

Modul penguat RF menerima masukan dari keluaran DDS setelah dilewatkan *band pass filter*, dari hasil pengujian untuk keluaran daya 10 Watt diperlukan tegangan +12 V dengan arus diperlukan arus $\pm 2,9$ A.

Dalam mengoperasikan modul penguat RF, panas yang terjadi pada pendingin dibatasi tidak boleh lebih dari 40 °C. Oleh karena itu pada pendingin penguat RF dipasang detektor suhu menggunakan LM-35 buatan *National Instrument* dengan catu daya 12 V_{dc}. LM-35 adalah rangkaian sensor suhu terintegrasi, linier dan presisi dengan fitur +10.0 mV/°C⁽⁶⁾. Sehingga untuk mendeteksi suhu 40 °C akan diperoleh tegangan keluaran dari LM-35 sebesar 400mV. Tegangan keluaran LM-35 ini akan dibaca oleh mikrokontroler dan ditampilkan pada layar LCD. Apabila suhu pendingin penguat RF melebihi 40 °C penguat RF akan diamankan sehingga terhindar dari kerusakan.

Pengukuran frekuensi

Pengukuran frekuensi dilakukan menggunakan *GW Intelligent Counter GFC-8131*, pada saat frekuensi keluaran *exciter* diprogram 77,667 MHz, tampilan frekuensi pada *frequency counter* menunjuk 77,667063 MHz seperti tampilan Gambar 15. Dengan demikian terjadi perbedaan 63 Hz. Perbedaan ini terjadi dikarenakan kristal untuk frekuensi referensi menggunakan kristal yang belum ada kompensasi suhu lingkungan. Oleh karena itu sedang diusahakan mendapatkan kristal yang sudah dilengkapi dengan kompensasi suhu yaitu kristal tipe *Temperature Compensated Crystal (TCXO)*, sehingga tidak terjadi selisih antara frekuensi yang diprogram dengan hasil pengukuran *frequency counter*.



Gambar 15. Tampilan frekuensi pada saat *exciter* diprogram 77,667 MHz

PERANGKAT LUNAK

Modul mikrokontroler ATmega16 perangkat lunak pendukungnya dikembangkan menggunakan VMLAB. VMLAB (*Visual Micro Lab*) adalah sebuah virtual *prototyping IDE* yang menggabungkan *IDE*, *Assembler*, *Compiler*, *Debugger*, dan *simulator* serta dapat mensimulasikan *hardware* (komponen elektronik).

Perangkat lunak telah dibuat dan sudah diuji unjuk kerjanya untuk mengatur beroperasinya *exciter* generator RF dan diperoleh hasil yang baik sesuai dengan rancangan. Fungsi perangkat lunak dibuat dalam bentuk menu pilihan yang dapat dipilih menggunakan tombol, (callouts 2) dan untuk mengubah nilai menggunakan tombol + atau - (callouts 3) yang ada di panel depan (Gambar 8.). Menu pilihan ada 10 fungsi yaitu :

1. **DDS freq** frekuensi keluaran *exciter* dapat diatur dengan step sesuai pilihan-2 seperti contoh pada Gambar 16.



Gambar 16. Contoh tampilan LCD

2. **DDS-step**
Pilihan : 1000 kHz.
 100 kHz.
 10 kHz.
 1 kHz.
 100 Hz.
 10 Hz.
 1 Hz.
3. **DDS-phase** pengaturan fase dengan step **11,25°**
4. **DDS-Ref** $6 \times$ frekuensi referensi = **180.000.000 Hz.**
5. **Current** maksimum arus penguat RF **5A**
6. **Vcc** maksimum tegangan penguat RF **13,8 V**
7. **Reflect** maksimum daya RF yang tidak tersalurkan **2,64 W**
8. **Forward** maksimum daya RF keluaran *exciter* **10,0 W**
9. **Temp** suhu pendingin ditentukan maksimum **40 °C**
10. **DDS PWR Control**
 - PWR UP posisi *default*
 - PWR DOWN tidak ada keluaran frekuensi

KESIMPULAN

Telah selesai dibuat *exciter* generator RF untuk siklotron DECY-13 menggunakan teknik *Direct Digital Synthesizer*. Pemrograman frekuensi keluaran DDS dilakukan secara serial dengan memasukkan data melalui pin-7 AD9851 dengan panjang 40 bit mulai bit LSB dan berakhir pada bit MSB. Untuk menghindari frekuensi ikutan yang tidak diharapkan diantaranya selisih dan atau kelipatan frekuensi *clock* dari DDS dan frekuensi keluaran *exciter*, keluaran DDS dilewatkan rangkaian *band pass filter* dengan frekuensi tengah 77,667 MHz. dan rentang frekuensi 2,249 MHz.

Pada daya 10 Watt penguat RF memerlukan tegangan DC +12 V dengan arus $\pm 2,9$ A. Untuk menghindari panas yang berlebih, pada penguat RF dipasang detektor suhu LM-35 yang digunakan sebagai masukan sistem pengaman.

Meskipun prototip sudah berhasil dibuat dan hasilnya sesuai yang diharapkan, tetapi masih perlu disempurnakan terutama mempersempit *bandwidth* keluaran *exciter* agar generator RF lebih efisien untuk mencatu sistem *dee* pada siklotron yang akan dibangun di BATAN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya pembuatan prototip *exciter* generator RF ini disampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan komunitas IQED khususnya Sdr. Wardhana N. , Iwan dan Agus atas masukan dan ide-ide dalam merealisasikan prototip *exciter*.

DAFTAR PUSTAKA

- ALEXANDER WU CHAO, MAURY TIGNER, *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, 2nd Printing, Printed in Singapore, (2002)
- PRAJITNO, "Perancangan Pembangkit Sinyal Sinusoida 78 Mhz. Dengan Teknik *Direct Digital Synthesizer*", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Vol. 12, Yogyakarta, (2010) 90 – 97

- A. CARUSO, A. SPARTÀ, YIN ZHINGUO AND A. LONGHITANO, “*Steps Forward in The Digital RF Control System at LNS*”, Proceedings of the 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Giardini Naxos, Italy (2007) 476 – 478
- RUZAIRI ABDUL RAHIM, TEO CHIN HENG, S. SULAIMAN, M. S. ABDUL MANAF, *Jurnal Teknologi*, 45(D), Universiti Teknologi Malaysia (2006) 19 – 39
- DONG LI, TONGNING HU, LEI CAO, BIN QIN, JUN YANG, JIANG HUANG, “*Design and Test of 10KW RF Amplifier Based On Direct Digital Synthesizer*”, *Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference*, Vancouver, BC, Canada (2009) 885-887
- CAHYA EDI SANTOSA, ARI SUGENG BUDIYANTA, *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol. 7 No. 1 (2009) 201-212